

KESAN NISBAH MOBILITI TERHADAP KECEKAPAN PENEMPATAN GEL

Ahmad Kamal Idris, Azman Ikhsan, Sugiatmo Kasmungin dan Siew Wu Yow
Fakulti Kejuruteraan Kimia dan Kejuruteraan Sumber Asli, Universiti Teknologi Malaysia,
81310 UTM Skudai, Johor Bahru, Malaysia

ABSTRAK

Kajian makmal telah dijalankan untuk mempelajari mekanisme aliran polimer pada proses pembentukan gel di dalam media berliang. Polyacrylamide pada kelikatan yang berlainan (20 - 54 cp) telah disuntik bersama penyilang-ikat, Cr^{+3} (200 ppm) dan Na^+ (1000 ppm) ke dalam model berskala mikro yang basah air pada keadaan suhu bilik. Aliran polimer di dalam sistem air dan minyak diperhatikan dengan menggunakan mikroskop. Peningkatan kepekatan polimer akan meningkatkan kelikatan larutan dan memberi kawalan mobiliti yang lebih baik. Kajian ke atas kesan pembaikan nisbah mobiliti terhadap peningkatan kecekapan penembusan larutan polimer di dalam media berliang telah dijalankan. Pada peringkat skala mikro, dapat diperhatikan bahawa polimer telah menembusi laluan yang tersedia untuk minyak, yang tidak tercapai jika larutan polimer yang kurang likat digunakan (nisbah mobiliti yang kurang baik). Pembaikan nisbah mobiliti meningkatkan kecekapan penempatan gel dengan membolehkan polimer menembusi laluan yang tersedia untuk minyak.
Kata kunci : Polimer, penyilang-ikat, nisbah mobiliti, minyak, kecekapan penempatan gel

PENGENALAN

Gel polimer diguna untuk menyumbat dan menghaial laluan air daripada mengalir melalui laluan tertentu dalam media berliang. Keberkesanan penggunaan gel di lapangan kurang memuaskan kerana kekurangan pemahaman tentang mekanisme gel yang dapat menurunkan ketertelapan air lebih banyak daripada ketertelapan. Liang dan Seright [1] telah mencadangkan bahawa mekanisme ini hanya berlaku di dalam model berskala mikro dan tiub kekaca, bukan di dalam batuan berliang. Selanjutnya keterbasahan batuan dikatakan mempunyai kesan ke atas mekanisme ini (Nilsson, Stavland dan Jonsbraten [2], tetapi kesan keterbasahan tidak cukup untuk menerangkan punca fenomena ini. Satu lagi mekanisme yang dipercayai mempunyai pengaruh ke atas fenomena ini ialah teori laluan segregat [1]. Dalam pengaliran larutan gel di dalam media berliang seperti yang diperhatikan oleh Liang, Sun dan Seright [3], terdapat laluan yang tidak tercapai oleh polimer. Laluan ini dikenali sebagai laluan tersedia untuk minyak. Polimer dasar air tidak menembusi liang ini dan gel tidak akan terbentuk dalamnya. Selepas pembentukan gel, kawasan ini tidak akan disumbat oleh gel dan minyak masih boleh mengalir. Objektif penyelidikan ini adalah untuk mengkaji kesan pembaikan nisbah mobiliti larutan polimer terhadap kecekapan polimer menembusi laluan yang tersedia untuk minyak. Manakala skop penyelidikan adalah mengkaji kesan pembaikan nisbah mobiliti ke atas penembusan liang oleh polimer pada peringkat skala mikro, mengkaji hubungan antara nisbah mobiliti dan kecekapan penempatan gel di dalam media berliang, meneliti pola pergerakan polimer di dalam laluan yang tersedia untuk minyak dan mengamati mekanisme polimer mengalir di dalam media berliang dalam proses penempatan gel adalah penting bagi merekabentuk proses penempatan gel yang optimum. Pembaikan nisbah mobiliti memberi peningkatan dalam kecekapan penempatan gel. Kecekapan penempatan gel ditakrifkan sebagai kebolehan polimer menembusi ke semua liang di dalam media berliang. Dalam penyelidikan berskala mikro ini, bagaimana pembaikan nisbah mobiliti dapat mempengaruhi kecekapan penempatan gel di dalam media berliang diperhatikan dan dikaji.

PEMBENTUKAN GEL OLEH POLIMER

Polyacrylamide juga dapat menghasilkan kelikatan yang memuaskan dalam air tawar dan menjerap pada permukaan liang untuk menurunkan ketertelapan formasi secara jangka panjang. Kekurangan utamajenis polimer ini adalah ia mudah mengalami degradasi ricih pada kadar aliran yang tinggi serta kurang berfungsi dalam air yang mengandungi kegaraman yang tinggi. Green dan Willhite[4] mendapati bahawa polimer akan membentuk gel dengan adanya kehadiran ion logam trivalen seperti Cr^{+3} atau Al^{+3} sebagai penyilang-ikat.

PENURUNAN KETERTELAPAN AIR DAN MINYAK

Liang, Sun dan Serig [3] serta Nilsson, Stavland dan Jonsbraten [2] menunjukkan gel polimer menurunkan ketertelapan air lebih daripada ketertelapan minyak di dalam media berliang. Liang dan Seright [1] mencadangkan berlaku pengecutan gel di dalam minyak tetapi mengembang di dalam air, kesan graviti mempengaruhi lokasi gel di dalam liang, kesan pelinciran, larutan gel atau gel telah mengubah keterbasahan batuan, gel dapat menyekat laluan air lebih daripada laluan minyak dalam liang tertentu, larutan gel lebih cenderung mengalir dalam laluan air berbanding laluan minyak dalam skala mikro, keseimbangan antara daya rambut dan sifat elastik gel mempengaruhi aliran air dan minyak yang berlainan, dan polimer disingkirkan dari gel dan menurunkan mobiliti air garam dengan ketara. Manakala, fenomena penurunan ketertelapan air lebih daripada ketertelapan minyak ini dikenali sebagai penurunan ketertelapan tidak berkadar. Mekanisme yang mengawal fenomena ini masih kurang difahami.

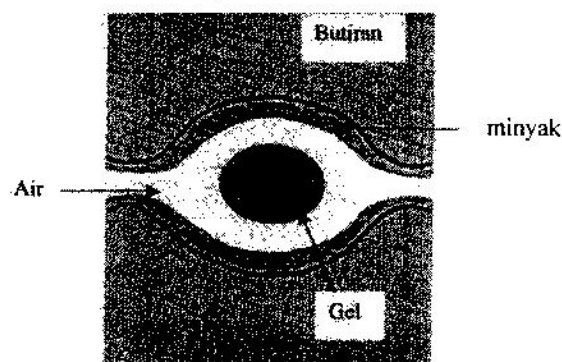
ALIRAN AIR DAN MINYAK DALAM GEL

Kajian ke atas aliran air dan minyak dalam sistem gel telah dijalankan oleh Dawe dan Zhang [5] untuk mengkaji bagaimana gel boleh menurunkan ketertelapan air lebih daripada ketertelapan minyak. Dalam liang tunggal yang diisi penuh dengan gel dasar air, air dan minyak dialirkan melalui liang ini. Air menembusi sistem gel secara resapan (diffusion) manakala minyak secara jejari (fingering). Perbezaan tekanan yang lebih besar dicatatkan untuk aliran air. Ini mencadangkan bahawa gel mempunyai kerintangan yang lebih tinggi terhadap aliran air berbanding dengan aliran minyak. Minyak mengalir melalui sistem gel dengan membuka satu laluan di tengah-tengah gel. Titisan minyak ini akan mengalir di dalam sistem gel ini seperti jejari. Ini kerana minyak tidak larut dalam gel yang dasar air. Al-Sharji *et al.* [6] mencadangkan teori yang serupa. Dalam kajiannya, air dan minyak disuntik melalui sistem gel di mana gel telah mengisi penuh liang tunggal. Air didapati larut campur dengan gel yang dasar air. Air meresap melalui gel seperti mengalir melalui media berliang. Dia mencadangkan bahawa ketertelapan air apabila mengalir melalui gel akan meningkat berkadar dengan kelajuan air. Bahagian tertentu rangkaian ini mengembang manakala yang lain mengecut, namun masih mengekalkan jumlah isipadu gel. Air mengalir melalui bahagian yang mengembang, mengelak daripada bahagian yang mengecut. Bahagian yang mengembang ini akan menentukan ketertelapan air. Dengan peningkatan kadar aliran, saiz bahagian yang mengembang ini akan turut bertambah. Oleh itu, ketertelapan air akan meningkat. Perubahan ini adalah boleh-undur (reversible) bergantung kepada kadar alir. Menurutny lagi, minyak yang tidak larut dengan air yang terkandung di dalam gel akan menembusi gel dengan membentuk titisan minyak di tengah-tengah liang. Apabila titisan minyak ini membuka laluan dalam gel yang elastik, sedikit tenaga tersimpan di dalam gel ini. Kedua-dua kajian di atas memberi kenyataan yang sama dalam menerangkan aliran air dan minyak dalam gel. Dengan ini, fenomena gel menurunkan ketertelapan air lebih daripada ketertelapan minyak dapat difahamkan. Namun, bagaimana gel menurunkan ketertelapan air dan minyak dalam sistem yang mempunyai air dan minyak sebelum suntikan gel tidak dapat diterangkan sepenuhnya dengan teori ini.

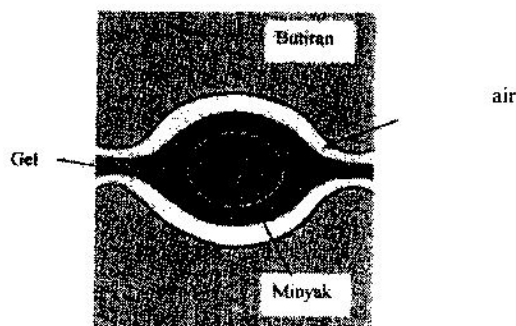
KESAN KETERBASAHAN TERHADAP PENURUNAN KETERTELAPAN

Nilsson, Stavland dan Jonsbraten [2] menjalankan kajian tentang kesan keterbasahan terhadap fenomena penurunan ketertelapan. Liang tunggal yang basah air dan basah minyak digunakan untuk mengkaji kesan keterbasahan ke atas penurunan ketertelapan. Dalam kajian mereka, minyak dialirkan melalui liang yang basah minyak. Titisan air baki didapati tinggal di tengah-tengah liang. Titisan air ini menurunkan ketertelapan minyak dengan mengurangkan luas aliran untuk minyak. Selepas ini, larutan gel disuntikkan dan pembentukan gel dibenarkan berlaku. Sistem gel HPAM yang digunakan dalam kajian ini mengalami sineresis di mana kumpulan acrylamide dalam polyacrylamide yang mempunyai berat molekul yang tinggi akan mengalami hidrolisis dan akan bersilang-ikat dengan kation divalen yang tersedia di dalam media tersebut. Ini menyebabkan gel mengecut daripada isipadu asalnya. Keadaan ini ditunjukkan dalam Rajah 2. Gel yang tertinggal di tengah-tengah liang bukan sahaja menurunkan ketertelapan air, malah juga ketertelapan minyak. Namun dalam kes ini, kesan titisan gel ini menyekat aliran adalah lebih ketara untuk air berbanding dengan minyak yang hanya mengalir pada sepanjang permukaan liang.

Liang dan Seright [7] menyetujui tentang perbincangan di atas hanya benar apabila larutan gel disediakan dalam fasa bukan pembasah. Dalam perbincangan di atas, larutan gel disediakan dalam fasa air, iaitu fasa bukan pembasah. Manakala Nilsson, Stavland dan Jonsbraten [2] seterusnya mencadangkan dalam liang yang basah air, gel dasar air akan mengalir sepanjang permukaan liang yang basah air. Titisan minyak baki tertinggal di tengah-tengah liang memberi halangan kepada aliran air dengan mengurangkan luas laluan untuk air. Apabila gel terbentuk tanpa mengalami sineresis, gel ini akan menyekat aliran untuk kedua-dua air dan minyak. Jika gel mengalami sineresis, titisan minyak baki di tengah-tengah liang masih memberi halangan kepada aliran air dan polimer (Rajah 2). Gel yang terbentuk di antara lapisan air dan minyak akan menyekat kedua-dua air dan minyak.



Rajah 1: Titisan gel yang terbentuk di tengah-tengah liang ini telah menurunkan ketertelapan air lebih daripada ketertelapan minyak[2].



Rajah 2: Air kekal pada permukaan liang yang basah air sementara titisan minyak baki berada di tengah-tengah liang. Gel menurunkan luas aliran untuk air dan minyak menyebabkan penurunan ketertelapan kedua-duanya[2].

KAWALAN MOBILITI

Mobiliti untuk sesuatu bendalir adalah ketertelapan sesuatu media terhadap bendalir tersebut dibahagikan dengan kelikatan bendalir tersebut. Nisbah mobiliti air terhadap minyak ialah mobiliti air dibahagikan dengan mobiliti minyak di dalam reservoir tersebut.

$$M = \frac{\frac{k_w}{\mu_w}}{\frac{k_o}{\mu_o}} = \frac{\lambda_w}{\lambda_o}$$

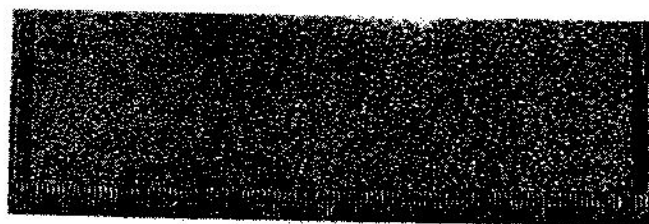
Sekiranya nilai nisbah mobiliti ini bersamaan dengan satu atau kurang, penyesaran minyak oleh air adalah berkesan. Polimer dapat memperbaiki nisbah mobiliti ini dengan meningkatkan kelikatan air. Seright [8] menyatakan bahawa pembaikan nisbah mobiliti ini akan dapat memperbaiki aliran polimer di dalam media berliang dengan menembusi lebih banyak liang (sama ada yang tersedia untuk air atau yang tersedia untuk minyak). Ini disebabkan kebanyakan larutan gel pada peringkat awal sebelum terbentuknya gel mempunyai kelakuan yang menyerupai larutan polimer. Maka larutan gel pada peringkat ini bersifat seperti larutan polimer dalam penyesaran minyak oleh polimer, akan dapat meningkatkan kecekapan sapu kawasan.

MODEL UJIKAJI

Model dalam Rajah 3 digunakan. Jaringan liang mempunyai dimensi 11.3 cm x 5.4 cm x 0.05 cm (panjang x lebar x kedalaman). Model dibuat daripada kaca dan pemerhatian menerusi mikroskop ke atas aliran bendalir di dalam jaringan liang dapat dilakukan. Saiz liang mempunyai julat 60 hingga 250 μm dan mempunyai nombor koordinat 3 hingga 4. Jumlah isipadu model ini dianggarkan sebanyak 1.2 ml. Model ini dianggap mempunyai keterbasahan air [5]. Ketertelapan mutlak dan keliangan model ini masing-masing dianggarkan 2.8 D dan 40%.

KAEDAH UJIKAJI

Polimer sebanyak 1.5 isipadu liang disuntikkan ke dalam model pada kadar 0.15 ml/min untuk ketiga-tiga kelikatan untuk mengelakkan kesan kadar suntikan ke atas mekanisme aliran polimer. Perbezaan tekanan dibaca melalui tolok tekanan dan dicatatkan dan ketertelapan efektif serta mobiliti polimer ini dihitung.



Rajah 3: Taburan liang di dalam model yang digunakan dalam ujikaji ini adalah rawak dan tidak tersusun dengan rapi

Secara amnya, kaedah ujikaji diringkaskan seperti di bawah:

1. Larutan polimer yang berkelikatan 20 cp dan 54 cp disediakan dengan melarutkan 1000 ppm dan 2000 ppm polyacrylamide di dalam 1000 ppm Na^+ dan 200 ppm Cr^{3+} .
2. Model ditepui dengan air garam (1000 ppm Na^+) pada kadar suntikan 0.34 ml/min. Ketertelapan mutlak model ditentukan.
3. Minyak disuntikkan pada kadar 0.15 ml/min sehingga ketepuan air baki. Ketertelapan efektif dan mobiliti minyak dihitung.
4. Lebih kurang 1.5 isipadu liang (1.5PV) air garam disuntikkan semula pada kadar 0.34 ml/min. Mobiliti air garam dikira. Ketepuan minyak sekarang dianggap sebagai ketepuan minyak baki pada permulaan suntikan polimer. Sebahagian minyak ini adalah boleh bergerak. Keadaan ini akan disetkan sebagai keadaan awal untuk setiap ujikaji.
5. Larutan polimer pada kelikatan 20 cp disuntik pada kadar alir 0.15 ml/min. Isipadu yang disuntik adalah lebih kurang 1.5 isipadu liang. Perbezaan tekanan dicatatkan dan mobiliti polimer dihitung.
6. Mekanisme aliran larutan polimer di dalam model diperhatikan melalui mikroskop dan direkodkan.
7. Ujikaji diulangi dengan menggunakan larutan pada kelikatan 54 cp. Kadar suntikan ditetapkan 1.5 ml/min supaya cara aliran polimer dapat dibuat bandingan antara kedua-dua ujikaji.

KEPUTUSAN DAN PERBINCANGAN

Data dalam Jadual 1 diperolehi daripada pengiraan dengan adanya data yang dikumpulkan sepanjang

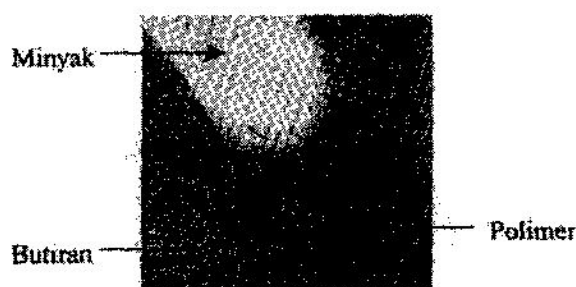
ujikaji. Daripada Jadual 1, dapat diperhatikan bahawa pertambahan polimer dalam air suntikan telah menurunkan nisbah mobiliti polimer terhadap minyak sebanyak lebih kurang 20 %.

JADUAL 1: DATA KEPUTUSAN UJIKAJI

Jenis bendalir	Air garam	Minyak	Polimer 1	Polimer 2
Kepekatan (ppm)	1000	-	1000	2000
Kelikatan (cp)	1.0	3.35	20	54
Kadar suntikan (ml/mi)	0.34	0.15	0.15	0.15
Perbezaan tekanan (atm)	0.085	0.170	0.306	0.374
Mobiliti	2.80	0.61	0.34	0.28
Nisbah Mobiliti	4.59	-	0.56	0.46

Polimer Sebagai Fasa Pembasah

Permukaan liang adalah basah air. Rajah 4 menunjukkan bahawa polimer (dalam warna biru) mengalir pada permukaan liang seolah-olah fasa pembasah, iaitu air. Ini kerana polimer ini disediakan dalam larutan dasar air. Maka polimer dikatakan mempunyai sifat pembasah seperti air. Sebelum pembentukan gel, sifat larutan polimer bertambah dengan penyilang-ikat adalah sama seperti yang tanpa penyilang-ikat.



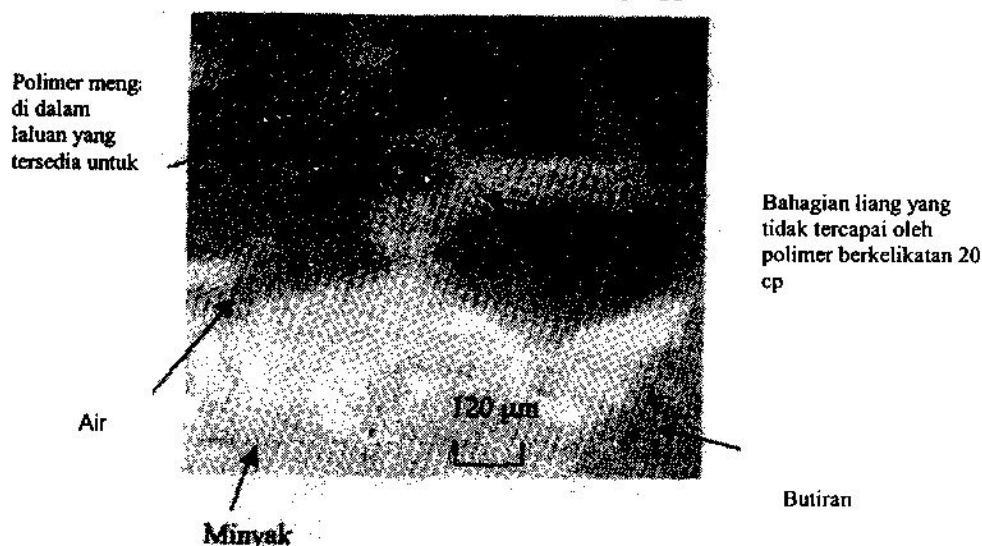
Rajah 4: Polimer mengalir pada permukaan liang seperti fasa pembasah, air.

Maka sifat penyesaran air dan minyak oleh polimer yang bertambah dengan penyilang-ikat ini dapat diperhatikan. Polimer mengalir di sepanjang permukaan liang dan menyesarkan air dan minyak. Polimer bertambah dengan penyilang-ikat ini telah menggantikan tempat air pada permukaan liang dan menyesarkan minyak seperti dalam penyesaran minyak oleh polimer tanpa penyilang-ikat.

Kawasan Tidak Tercapai Oleh Polimer

Apabila polimer berkelikatan 20 cp yang mempunyai nisbah mobiliti 0.56 disuntik ke dalam model, terdapat kawasan liang yang tidak dapat tercapai oleh polimer ini (Rajah 5). Polimer mengalir dalam laluan yang tersedia untuk air. Laluan tersedia ini tidak bermaksud bahawa hanya air yang mengalir di dalam laluan ini. Laluan tersedia untuk air bermaksud air mengalir dengan lebih mudah di dalam laluan ini berbanding yang lain. Nilsson, Stavland dan Jonsbraten [2] menyatakan bahawa faktor yang mempengaruhi aliran adalah saiz liang dan keterbasahan. Polimer tadi telah menyesarkan air yang berada di dalam laluan ini dan menggantikan tempat air. Fenomena ini adalah benar seperti teori laluan air dan minyak segregat oleh Liang dan Seright [1]. Laluan yang tersedia untuk minyak yang lebih tinggi tidak dilalui oleh polimer dan minyak yang berada di

dalam liang-liang ini tidak diganggu oleh polimer. Ini menerangkan sebabnya ketertelapan air menurun lebih banyak daripada minyak selepas gel terbentuk kerana laluan air telah disekat oleh gel polimer manakala laluan minyak kekal tidak terganggu.



Rajah 5: Bahagian liang yang tidak tercapai oleh polimer berkelikatan 20 cp.

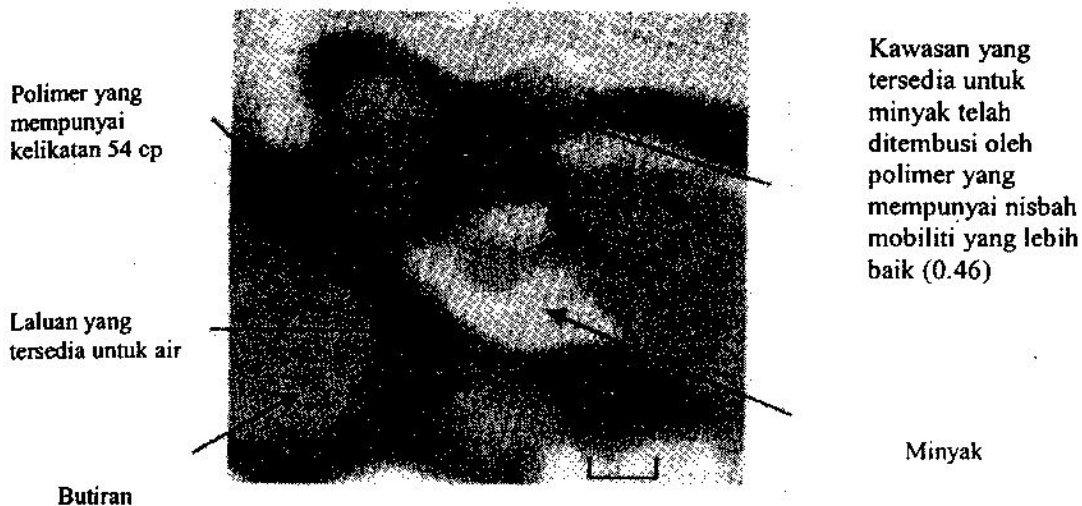
Implikasi Pembaikan Nisbah Mobiliti

Dalam suntikan polimer berkelikatan 54 cp yang mempunyai nisbah mobiliti 0.46 menunjukkan pengurangan kawasan tidak tercapai oleh polimer ini dan polimer tadi telah menembusi kawasan yang tersedia untuk minyak (Rajah 6). Minyak lebih mudah mengalir di dalam laluan ini maka ketepuan minyak adalah lebih tinggi berbanding dengan kawasan yang lain. Keadaan ini dapat diperhatikan di dalam Rajah 5 di mana kawasan yang tidak tercapai oleh polimer mempunyai ketepuan minyak yang tinggi. Ini menunjukkan liang-liang ini adalah tersedia untuk minyak dan minyak lebih cenderung mengalir di dalamnya. Maka dalam Rajah 6, dapat diperhatikan bahawa polimer telah menembusi kawasan ini dan menyesar minyak yang berada di dalam liang ini. Berikutan ini, bahagian liang ini akan disumbatkan oleh gel polimer selepas pembentukan gel. Dapat diperhatikan bahawa selain daripada liang yang tersedia untuk air, sebahagian daripada liang yang tersedia untuk minyak telah ditembusi oleh polimer. Oleh itu, selepas pembentukan gel, bukan sahaja ketertelapan air akan menurun, malah ketertelapan minyak juga akan menurun.

KESIMPULAN

Daripada hasil perbincangan ujikaji yang telah dijalankan dapat disimpulkan bahawa:

1. Pembaikan nisbah mobiliti membolehkan polimer menembusi liang-liang yang tersedia untuk minyak, mempengaruhi kecekapan penempatan gel dengan menambahkan kawasan yang ditembusi oleh polimer dan mobiliti mempengaruhi kecekapan penempatan gel dengan menambahkan kawasan yang ditembusi oleh polimer.
2. Minyak di dalam laluan yang tersedia akan disesarkan oleh polimer jika polimer pada keadaan nisbah mobiliti yang rendah.



Rajah 6: Polimer telah menembusi ke dalam kawasan yang tersedia untuk minyak.

PENGHARGAAN

Kajian ini menggunakan kemudahan projek vot IRPA no. 72019.

SIMBOL

M = nisbah mobiliti air terhadap minyak

k_w = ketertelapan efektif untuk air, Darcy

μ_w = kelikatan air, cp

k_o = ketertelapan efektif untuk minyak, Darcy

μ_o = kelikatan minyak, cp

λ_w = mobiliti air, Darcy/cp

λ_o = mobiliti minyak, Darcy/cp

RUJUKAN

1. J. Liang, and R. S. Seright, Further Investigations of Why Gels Reduce Water Permeability More Than Oil Permeability, paper SPE 37249 presented at the 1997 SPE International Symposium on Oilfield Chemistry, Houston, 18-21 February 1997.
2. S., Nilsson, A. Stavland, and H. C. Jonsbraten, Mechanistic Study of Disproportionate Permeability Reduction, paper SPE 39635 presented at the 1998 SPE/DOE Improved Oil Recovery Symposium, Tulsa, Oklahoma, 19-22 April 1998.
3. J. Liang H., Sun, and R. S. Seright, Why Do Gels Reduce Water Permeability More Than Oil Permeability? paper SPE 27829 presented at the 1994 SPE/DOE Symposium on Improved Oil Recovery, Tulsa, OK, April 1994.
4. D.W.Green, and G.P.Willhite, Enhanced Oil Recovery, SPE Textbook Richardson, Texas, 100-185(1998).
5. R. A. Dawe, and Y.,Zhang, Mechanistic Study of the Selective Action of Oil and Water Penetrating

- into a Gel Emplaced in a Porous Medium, J. Pet. Sc.Eng. 12, 113-125(1994).
6. H. H. Al-Sharji, C. A. Grattoni, R. A. Dawe, and R. W. Zimmerman, Pore-Scale Study of the Flow of Oil and Water through Polymer Gels, paper SPE 56738 presented at the 1999 SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Houston, Texas, 3-6 October 1999.
 7. J. Liang and R. S. Seright, Wall-Effect/ Gel-Droplet Model of Disproportionate Permeability reduction, paper SPE 59344 presented at the 2000 SPE/DOE Improved Oil Recovery Symposium, Tulsa, Oklahoma, 3-5 April 2000.
 8. R. S. , Seright, (1991). "Impact of Dispersion on Gel Placement for Profile Control," paper SPE 20127 presented at the 1990 SPE Permian Basin and Gas Recovery Conference, Midland, March 8-9 1990.